TITLE:

37.自律形成と時間遅れ : 貝殻の模様形成を例として(パターン形成、運動と統計,研究会報告)

AUTHOR(S):

郡司, 幸夫

CITATION:
郡司, 幸夫. 37.自律形成と時間遅れ : 貝殻の模様形成を例として(パターン形成、運動と統計,研究会報告). 物性研究 1988, 50(3): 441-456

ISSUE DATE:
1988-06-20

URL:
http://hdl.handle.net/2433/93085

37. 自律形成と時間遅れ－貝殻の模様形成を例として

郡司　幸夫（神戸大・理）

1. 緒言

我々が生命を前にして特別の興味を持つ点は、その予測し難い振舞いであり、あたかも目的をもつかのような機能（functionの変化）である。個体発生レベルにおいて、それは次々と継起する形態形成の渦として起こり、個体群以上のレベルでは不連続的な進化パターンとして認められよう[1]。つまり事象列$\underline{A_1}$, $\underline{A_2}$, $\underline{A_3}$, … が認められる時に、$\underline{A_2}=\underline{F(A_1)}$, $\underline{A_3}=\underline{F(A_2)}$ といった規則Fが見出せず、$\underline{A_2}=\underline{F_1(A_1)}$, $\underline{A_3}=\underline{F_2(A_2)}$ であって、$\underline{F_1}$, $\underline{F_2}$, … なる系列に意味を見出せない時，我々はそこに目的因なる概念を充てるのである。これは、事象列$\underline{A_1}$, $\underline{A_2}$, … が、一般に非可逆過程であり、$\underline{F_1}$, $\underline{F_2}$, .. はそれを平衡系の変換則として記述したが故に生起する記述の限界と見なせよう。ところで系列$\underline{A_1}$, $\underline{A_2}$, … を認めるという点は、既に、観察者がどういった立場でそれを見ているかに依存している。従って観察する位置によって上述の目的因が要請されるような自己組織化するシステムを自律的システムととりあえず考えることにしよう。こう明言することによって、我々は目的因をモデル化するという一見自家撞着的記述を可能にする（さもないと、モデルとして記述できないものを目的論的現象と定義せしめ、それを記述し得た時、対象は既に目的論的でないということになる。認識される描象の相違が何に依存するかを言明することで、両者の描象の変換が可能となる）。

自律システムにおいて、$\underline{A_1}\rightarrow\underline{A_2}\rightarrow\underline{A_3}$ なる事象の系列を考え、

$$\underline{A_1}\rightarrow\underline{A_2}\rightarrow\underline{A_3}$$
$$\underline{f_1}\quad\underline{f_2}$$

なる$\underline{f_1}$, $\underline{f_2}$ の変化をどう記述するかを考察しよう。つまり$\underline{f_1}\rightarrow\underline{f_2}$ を目的なる述語を用いないで記述するということである。

第1の立場は、$\underline{f_1}\rightarrow\underline{f_2}$ なる変換をメタレベルで記述する方法である。この$\underline{F}$: $\underline{f_1}\rightarrow\underline{f_2}$ の記述は一見して trivial さを免れないが、$\underline{A_1}$, $\underline{A_2}$ なる核状態の境界条件を明確に規定してやることで、第2、第3の立場への step たりえよう。

第２、第３の立場は互いに逆のもので、ここでは各々客体的記述、主体的記述と呼ぶことにする。

第２の立場とは、非可逆変化を完全に統計力学から記述し尽くそうとする立場である。システムを構成する単位の個性を記述する決定論は用意されない。ここでは平衡から遠く離れて非可逆過程を実現するゆらぎの統計的挙動の記述が主眼となる。常にシステムなるものは、平衡から遠く離れた点にあることで自己組織化するシステムたり得るという記述を目指すものといえ、Prigogene[2] 等の出発点はここにあったと考えられる。

第３の立場は、自律系を（noise による統計力学的記述を包含せず）、存在せんとする主体として捉える立場である。Varela [3),4)] の出発点はまさしくこの点にあり、「自己が維持されるということは、自己が自らを維持するが故に、自己なる状態が存在することである」という概念を根幹とする。先の図式で考えるなら、$\underline{A_1}\rightarrow\underline{A_2}$ へ自らを変える$\underline{f_1}$なる行為によって$\underline{A_1}$なる状態があり、為に$\underline{A_2}$へと変換された時には$\underline{A_2}$を自己画定する$\underline{f_2}$が出現するのである。

つまり、Varela は存在する主体なるものから出発した時、状態とそれを写す写象、operand と operator、事物とその行為が切り離せないのだということを主張するわけだ。それによって自己を記述する決定論の中に、自己変換（合目的的に見える）さえも包含してしまう。これは正しく松野のいう境界条件と変換規則の関係[5),6)] と同義であろう。Varela が自己創出系（autopoietic system ）なる述語を用いるのは自律系を主体的（存在する自己を決定論的に扱うという意味で）に記述した時にのみ用い得るのである。

この意味で chaos 研究のアプローチは、Varela 的アプローチの継承ともいえよう。ここで自律系、いってみれば自己組織化するシステムの捉え方における現状を概観してみよう。Prigogene にせよ Haken[7)] にせよ、摂動を受けているシステム、つまり摂動に対し外部に開かれたシステムとして、それを記述する。従って、それは、決定論的に記述可能な内部とそれを揺り動かす外力の結合として次のように記述されよう。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \underline{-\alpha u+F(t)}$$

$\underline{F}$は摂動項

決定論的に捉え得るシステムの‘閉じた’側面と、摂動を受容し得る‘開いた’側面の結合として開放系を位置づけるわけだ。Varela もその近著[3] において、開きつつ閉じた operational closure なる概念を自己組織化の中枢に据える（そこでは、摂動はシステムの外部からシステムを他律的に変化させるものではなく、また、我々がシステムを外界に対しどこで閉じているかと認識する、対象の世界からの切取り方によって、摂動の意義は違ってくる点を強調してはいる）。

さて、あまねく自己組織化モデルに見られる決定論と摂動の結合に対し、我々は本来、そのように認識し得る視座とはどういったものなのかを問う必要がある。これは最初に述べた目的論の記述を可能にするためにも、視座つまりは観察者と対象の関係を位置づける空間の規定が一義的であることを意味する。その空間にあって我々は、その 端成分的記述 としての主体的記述も客体的記述も可能たらしめる。

かかる 観察者の位置が記述できる空間は如何にして可能か?　ここでは貝殻の紋様－特にアサリ（Ruditapes phillipinarum (A. Adams)）において顕著な－にみられる複雑なパターンを例にとり、パターンの変化が予見できないような現象として捉えられ、あるレベルでそのパターンを創るシステムを記述すると、決定論と摂動の結合と認められるが、完全に主体的な記述もまた可能であるということを簡単にスケッチしてみることにしよう。

ここでは視座の end member、別言すると一方の極限といった理想化された視座としての主体的立場からのアプローチを試みよう。

2．自己参入なる行為としての自己画定

我々が対象を記述するということについて考えてみよう。一般にそれは世界から切り取られた状態、境界条件$\underline{S}$と、それが外界に対し所作する行為$\underline{f}$のペア（$\underline{S}$，$\underline{f}$）として記述されよう。ここで$\underline{S}$と$\underline{f}$を結び付ける必然性は如何に説明されるか?　実は$\underline{S}$と$\underline{f}$の関係は、観察者側において見出されるにすぎず、対象それ自体の立場から言えば、客観的に記述されるといえる。ここでは観察者と対象間の関係が本来問題となる。一方、$\underline{S}$と$\underline{f}$を区別しない記述とは何を意味するのであろうか。前述のようにここでは$\underline{S}$たらしめる$\underline{f}$が$\underline{S}$自体になっている。そこでこのような記述を意図した Spencer-Brown[3] の代数を Varela[3] に従って用い

ることにしよう（しかし観察者とSとの関係、Sの外部世界Wとの関係を各々g, hとするとき、$f \circ g = h$ なる可換性を規定する限りにおいてSとfの関係は記述し得る。∘は、関係の合成を意味する）。

Spencer-Brown の代数（以下、ブラウン代数）は、‘区別された状態’と‘区別されない状態’を、⌉及び ⌴ で記述する二値論理で、この区別は我々の記述が全て何がしかの区別を意味するものだという事実を抽象化したものだと考えられる。これには、operand と operator の区別がなく、同じ二値論理としてのブール代数と対比してみるなら、operand としては1を⌉, 0を ⌴ に対応づけられ、operator としては、$\overline{a|} = \neg a$（aの否定），$ab = a \vee b$（aまたはb）とみることができる。またブラウン代数は以下の二つの等式を公理とし、

⌉⌉ = ⌉

$\overline{\overline{\ \ }|}|$ = ⌴

これをもって、

$\overline{\overline{p|}\,p\,|} =$ ⌴

$\overline{\overline{pr|}\ \overline{qr|}\,|} = \overline{\overline{p|}\ \overline{q|}\,|}\ r$

が証示可能とする。但し、p, q, rは、変数で、⌉または ⌴ なる値をとる。ここから代数系を構築できるわけだが、区別なる実在を再参入（re-entry）から説明する点が、Spencer-Brown や Varela の視点に見られる特異性といえる。つまり自らの状態を自らの行為によって内-形式化（in-form）するものとして、次のように（最も単純には）記述する。

$f = \overline{f|}$

ここで自らの状態fは⌉か ⌴ である。またこの表現は、代入を繰り返す操作と同じ表現－無限に続く再参入としてのfをも表現していることが、

$(f = \overline{\overline{\overline{f|}\ \ldots\ |}|})$

代数の規則から明らかとなっている。f自身を⌉（ここでは operator として）なる操作で表現しようという行為自体がfになるといった意味に対し、自己参入、再参入という述語が当てられている。

さて、ここで$f = \overline{f|}$ の値について考えてみると、f = ⌴であってもf = ⌉であっても等式が成り立たないことに（公理より）気づく。ここから、Sとfと互いに自己規定しようとする主体的記述は、自己矛盾を含んだものであることが導かれ

る。しかしこの自己矛盾は時間の導入によって次のように解消できる。

$$\underline{f(t+1)} = \overline{\underline{f(t)}}|$$

こうして主体的記述は、対象を時間的振動として認識させるということが結論づけられる（この最も単純な例では、┐,└┘,┐,└┘,┐，　つまり ˥_˥_˥_...なる振動として）。

Varela[3]はさらに考察を進め、振動を時間的なものとしてではなく、1周期の系列を空間的に新たなる値と看做すことで、多値論理を構築し、これを波形算術（waveform arithmetic）と呼ぶ。そして振動状態を時間的振動とみるか空間的値とみるかの相補性から、制御と自律の相補性にまで言及するが、これに関しての厳密な定義はなされていない。そこで主体的記述について今一度考察し、次に自己組織化の問題について論じることにしよう。

3．非同時的反転オートマトン

主体的記述が全ての状態を振動として認識せしめるとき、時間と空間はどのような関係にあるか？　任意の周期振動に対し、それを解とする operator を構築するアルゴリズムが存在する（Varela[3]，lemma 12·62）から、ここで（└┘，┐，　）なる周期3の振動について考えよう。Varela[3] に従うと、我々はこれに対し

$$\underline{x} = \overline{\underline{x}\ \underline{y}}|$$

$$\underline{y} = \overline{\overline{\underline{x}}|\ \underline{y}}| \qquad (1)$$

なる連立方程式を得ることができ、初期状態（$\underline{x_0}$，$\underline{y_0}$）＝（└┘，┐）を与えれば、$\underline{x}$ = _⎍_⎍_ … なる振動を確認できる。ここでは振動は時間的振動を意味しているから、式（1）の意味は、

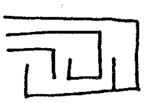
$$\underline{x(t+1)} = \overline{\underline{x(t)}\ \ \underline{y(t)}}|$$

$$\underline{y(t+1)} = \overline{\overline{\underline{x(t)}}|\ \ \underline{y(t)}}|$$

と捉えることができる。振動を空間的に表現するとき、振動を再参入の表現として、┐，，に次ぐ第3の値とし導入できる。ここでは、

$$\underline{y} = \overline{\overline{\underline{x}}|\ \sqcup}|$$

より、

$\underline{x}$ =  (2)

の形で表現できる。さて Varela[3] は、振動に対するこれら２つの表現が共に可能であることから、時間／空間の相補性を主張するが、ここでさらに考察を進めてみよう。

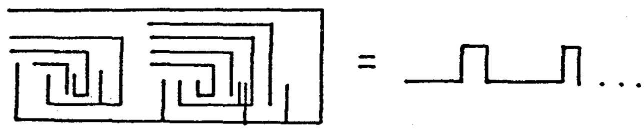
時間的振動を解とする operator が、$\underline{x}$ と $\underline{y}$ なる異なる空間成分に分割され、そこで $\underline{x}$ と $\underline{y}$ は同時的に updating（遷移規則で作動）している。しかるに（２）で空間的振動として表現される値は、時間を包含した（delay を含んだ）operator としての意味を持つことが予想される。それは、実は（２）の形式そのものが表現している。（２）は、

$$\underline{x(t)} = \overline{\overline{\underline{x(t-2)}|\ \ \underline{x'(t-1)}}|\ \ \underline{x(t-1)}}|$$

に等価である。$\underline{x}$' は $\underline{y}$ と等価であるが、（２）より $\underline{x}$ の部分系であることが理解できよう。つまり我々は、周期振動を作り出す（２）のような再参入の operator によって、時間遅れの形式が理解できる。

逆に、例えば連立方程式を構成せず、図１のような operator を作っても、我々はその折り返しの部分に注目することで、

$\underline{x}$ =



をえることができる[10]。

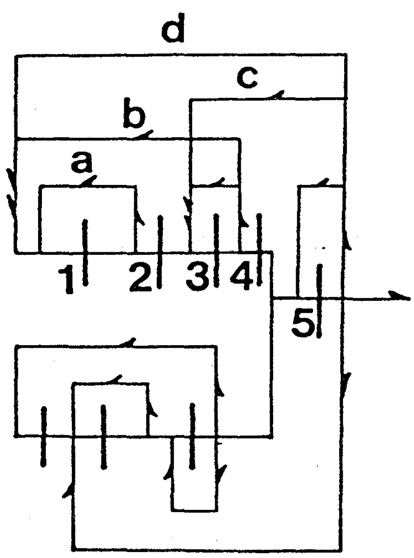


図１

さて、以上で述べた連立方程式と時間遅れの operator との関係は、記憶部位

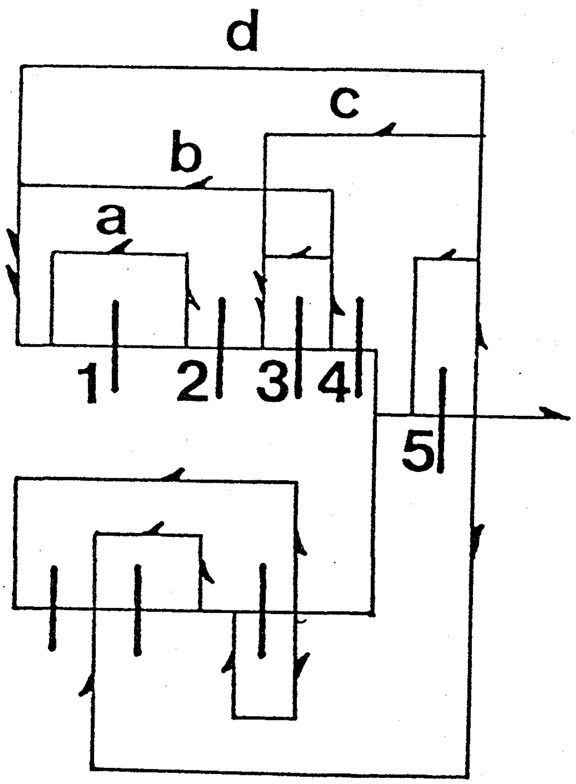


図１．　式(1)を回路図で表現したもの。太線がcrossまたはmarkを示し、それを通過することが、値の反転を意味する。再参入を示す矢印付きの線は、crossをくぐり抜けて戻っていることに注意。再参入による矛盾を時間で解消するとき、再参入する直前のcrossを戻ることにより、waveformとしての値（周期振動の１周期系列：$a_i \in B=\{⌉, ␣\}$としたとき、waveform $\mathcal{a} \in P=\Pi B$)は、1 stepずれると考えることにより、定常値としてwaveformが得られる。cross 5の右をt時とすると、左で t-1, 更にcross 3の左で t-2, cross 1の左で t-3 となる。すると再参入 a は、t-2 から t-3 へ，1 stepずれることになり（t-2 の値を$(x_1, x_2, .. , x_n)$とすると、再参入による値は$(x_n, x_1, .. , x_{n-1})$）、再参入 d では t から t-3 へ 3 step ずれる。このようにして waveform(␣, ␣, ⌉, ␣) が得られる。

を同時的 updating の多成分に配分するセル・オートマトンの基本概念と言える。これは対象が多成分系として構成されるから連立方程式が要請されるのではなく、観察者が対象の構成単位と認めたものを主体的に扱うか否かの問題である。

自己維持によって単位として現れる細胞を想起してみよう。細胞が‘実在する単位’として認識されるならば、我々は細胞間相互作用を（簡単のため最近接者間のみとする）、

$$a_i(t+1) = f\,(a_{i-1}(t),\ a_i(t),\ a_{i+1}(t)) \qquad (3)$$

という形式で記述するであろう。

ここで細胞たる存在者を、自らを存在たらしめる主体であると考えて記述してみよう。最も単純には $a_i(t)$ たらしめる operator を $\mathbf{C} = (c_1,\ \cdots,\ c_n)$ 成分系で表現し、

$$a_i(t+1) = f\,(a_{i-1}(t),\ a_i(t),\ a_{i+1}(t))$$
$$a_i(t) = \pi_i\,(\mathbf{C}(t))$$
$$\mathbf{C}(t+1) = T\,(\mathbf{C}(t))$$
$$(\text{但し、}\quad \pi_i\,(\mathbf{C}) = \pi_i\,(c_1,\ \cdots c_i,\ \cdots c_n) = c_i)$$

とすることが考えられる。これによって図２にみられるようなパターンが得られるが、主体的記述の基本概念にたちかえると、これでは不十分なことがわかる[10]。つまり、細胞が自らを自己画定するものとして記述するなら、そこに出現する┐と└┘，との振動は外部つまりは近接細胞と自らの区別、非区別としてたち現れるからである。それは updating の非同時性として記述され、最も単純には

$$a_i(t+1) = \overline{\overline{f(a_{i-1}(t),a_i(t),a_{i+1}(t))}\ \overline{b_i(t)}}$$
$$\overline{\overline{a_i(t)}\ \overline{b_i(t)}} \qquad (4)$$
$$b_i(t+1) = \overline{g(a_i(t),b_i(t))}$$

と表現される。これによって $a_i(t)$ が生成するパターンは見かけ上 f に従っていないことがわかる。ここでは言ってみれば、自らの状態 $a_i(t)$ によって自らの行為（相互作用）が決定され、その逆も成立している。b_i の operator をもう少し複雑にしてやると、事態はより明瞭になる。つまりそこでは b_i を同時 updating の多成分系にし（b_i）、それによって a_i 自身が a_{i1}, …, a_{im} なる多成分系として表現されることになる。これは先のように updating を非同時的とみ

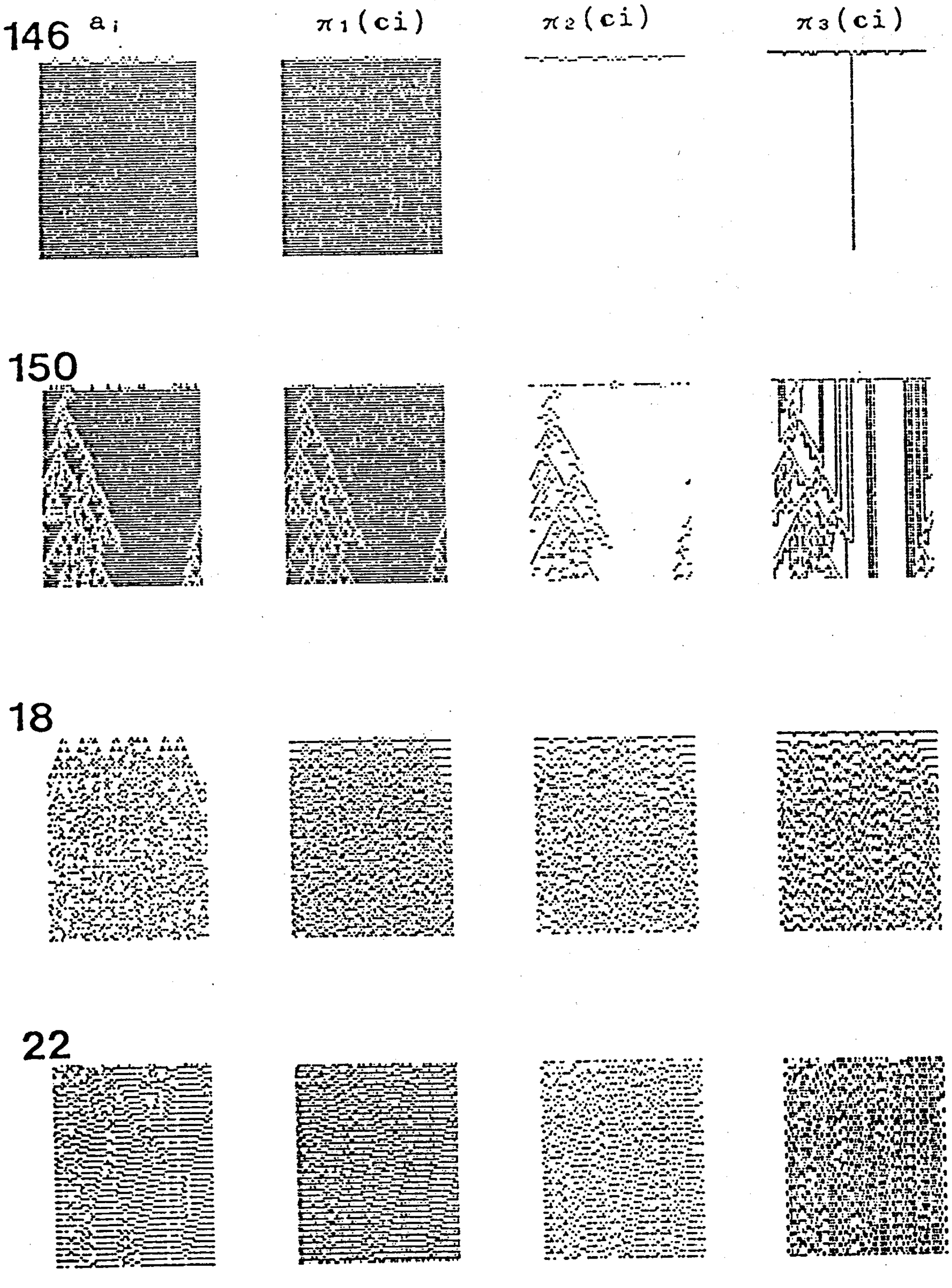


図２．　式(3)の数値計算例。　a_i の各cellで 4 成分系の再参入を行い、$\pi_4(C_i)=a_i$としている。数字は、式(4)の相互作用 f を示す rule number[16]．

ることで理解しやすくなる。自らの行為にスイッチをいれる$\underline{b}$の operator に時間遅れが包含されるのと同様、$\underline{a_i}$の遷移規則内に$\underline{a_i(t-1)}$, $\underline{a_i(t-2)}$, $\underline{b_i(t-1)}$, … 等が含まれることになる。つまり f はただ 1 個の規則として与えられていても、$\underline{b_i(t)}=¬$ or ⊔ $\underline{b_{i-1}(t)}=¬$ or ⊔ 等によって $\underline{f(a_{i-1}(t),\ a_i(t),\ a_{i+1}(t+1))}$ であったり、$\underline{f(a_{i-1}(t+1),\ a_i(t),\ a_{i+1}(t+1))}$ であったりすることで、見かけ上、$\underline{a_1}$, …, $\underline{a_n}$ なるシステムの時間発展の中で、時間的にも空間的にも変化したかのごとく振舞うことになる。

これは正しく松野[5)]のいう生物システムにおける相互作用の有限時間伝播に対応している。しかし重ねて言うが、実際に有限時間を要するか否かという議論は本質的でない。今までの議論を通してわかるように、有限時間を要するかのように見える相互作用の媒体単位を、我々がどういったレベルで認識するかによって、有限時間を要し、非同時的に updating しているようにも捉えられるし、今いった単位をさらに細かいレベルで認識すれば、より細かな単位レベルでの同時的 updating として、上位の単位レベルでの非同時性が捉えられるかのようにもみてとれるのである。

我々が主体的記述というアプローチを取る限りにおいて、全ての対象の構成単位は振動としてたち現れ、相互作用は有限時間を要するかのように（時間 side で記述するなら）みえるであろう。では、対象を自律系として認識させるか否かの鍵はどこに求められるのであろう。筆者は、それを視点の相違による対象認知の相違に求める。

我々の現時点における対象の単位認定には限界があるとみても妥当であろう。このとき、主体的記述を採用すれば、原理的に全てのシステム構成単位は振動子を看　されるが、周期単位の認定にも限界がある以上、それは周期 1 つまり、¬, ¬, ¬, … か ⊔, ⊔, ⊔, … として認定される領域が存在しよう。この時、単位を存在者とするアプローチとの違いは現出せず、システムは単純な（３）のような規則（updatingも同調的）で記述されるか、固定点として認識されよう。

一方、システム構成単位の振動が認知され得るものならば、主体的アプローチでは、相互作用の遅れという問題が顕在化するであろう。同じ対象に対して単位の主体的実在を考慮せず$\underline{f}$の updating を同調的と考えると、対象の挙動は摂動を加えられることで理解されることになる。

以上のように単位レベルが設定されているなら、自己組織化するか否かは弁別可能となる。しかも、これは逆に我々がどのレベルで単位を認定するかによって、システムは自律的にも、そうでないようにも見えるということを示唆している。

ここで今一度、主体的アプローチと客体的アプローチについて考えてみよう。主体的アプローチによる単位の operetor 構築は、時間遅れにより決定論的に表現される。単位間の相互作用を認めながらも、単位の時間的意味（実は一般に、単位を世界とそれを区別し得る空間概念としてしか捉えない点に問題がある）を認めないならば、その相互作用の形式では表現しきれない自己組織化的挙動には、摂動が説明の一翼を担うことになる。結局、単位を時空間の中でどう表現するか、（単位を前提とする限りにおいて）その定義によって摂動の用・不用が導かれる。今、時空間における現象の記述を問題にしているので、単位を時空的に認知することで決定論的記述の可能性がある。これが主体的アプローチの本質ではないか。一方で単位を個性のない粒子レベルにまで還元し、単位の意味を喪なわせるなら、我々はその全体の挙動を統計的に扱い得よう。
次に、主体的アプローチを時間遅れとみた時に、複雑な貝殻の紋様形成が完全に決定論的に記述される例を取り上げる。

4. アサリの貝殻にみられる紋様形成

本節では、同時的 updating と非同時的 updating の違いを二枚貝の殻表面に認められる色素パターンから論じてみよう。貝の色素パターンについては、Turing[11] に端を発する反応一拡散系を基礎としたモデルがいくつか提出されている[12][13][14]。中でも Meinhardt & Klinger[15]は、様々な貝殻表面のパターンの変異を殆ど説明し尽くしたかに見える。しかし彼らのモデルにおいて、mesh-work pattern と局在振動波のようなパターンは成分の数が異なる別個のモデルで説明される。殆ど全ての場合において、軟体動物の殻模様は、kink 状の波、孤立波、振動波の組合せとして表現されるが、その組合せ方は任意であるかのようにすらみえる。我々はそれらに対し、モデルを適宜重ね合わせるということをしなければならないのだろうか?

アサリにおいて、パターンの複雑さはとりわけ顕著である。孤立波の衝突だけを例にとっても、ソリトン的に通過してしまうもの、互いに消滅するもの、一方

のみ消滅するものと様々な場合が、一個体の個体発生上認められる。これを以下の事実に基づき次のようにモデル化しよう。

貝殻のパターンは、殻周縁の殻自体の付加成長に伴い、1次元的に色素が沈着されて形成される。従って2次元的に結果として得られるパターンは、色素の存在、不在を状態1、0に対応させたセル・オートマトンでモデル化できよう。ここで色素の沈着が最近接細胞間の相互作用によって決定されるとすると、状態遷移規則は（3）式で与えられる。fとして Wolfram[6] のいうRule 18 (f(⌴, ⌴, ¬)=¬, f(¬, ⌴, ⌴)=¬, それ以外の$(a_{i-1}(t), a_i(t), a_{i+1}(t))$の組合せに対しては、⌴ を出力する）を与えてみると、class 3 の三角形状パターン（Wolframは、1次元セル・オートマトンの時間発展によって生成されるパターンから、遷移規則を4個に分類した。空間的に均質なパターンを生成する規則を、class1，初期状態に依存して局所的な安定パターンを生成する規則を、class2，カオス的なパターンに対しては、class3，それ以外の複雑なパターンを創る規則を、class4と呼称した）が得られる。実際かかるパターンは巻貝、二枚貝を問わず非常に多く認められるパターンであるが、このモデルを基礎とし、updating を非同時的に導く再参入の operator を結合してやることで、どのような効果が得られるであろうか。

ここでは簡単に、（（4）式を例にとると）b_i の再参入 operator にa_i を含めず、a_i と独立に周期振動するものと考える。但しその周期pは、システムサイズNよりも大きなものとする。それを次のように表現しよう。

$$a_i(t+1) = \overline{\overline{f(a_{i-1}(t_1),\ a_i(t),\ a_{i+1}(t_2))}|\ \overline{b_i(t)}|}|\ \overline{\overline{a_i(t)}|\ b_i(t)}|$$

但し　$j_i(t) < m$　のとき　$b_i(t) =$ ⌴,

　　　$j_i(t) \geqq m$　のとき　$b_i(t) =$ ¬

$(t_1,\ t_2) = (t,\ t)$　if　$j(i) < j(i-1),\ j(i+1)$

$(t_1,\ t_2) = (t+1,\ t)$　if　$j(i-1) < j(i),\ j(i+1)$

$(t_1,\ t_2) = (t,\ t+1)$　if　$j(i+1) > j(i),\ j(i-1)$

$(t_1,\ t_2) = (t+1,\ t+1)$　if　$j(i) > j(i-1),\ j(i+1)$

$$j_i(t+1) = j_i(t) + 1 \mod m$$

但し、mod m は、mで割った余りを意味する。ここで $j_i(0)$ をランダムに与えることで、updating の非同時性が実現され、$j_i(t)$ の周期性より隣接者のどちらが先に反転するかも時間的に変化していく[16]。　さらに非同時性の操作に1 time step で２回反転する操作を含め、周期をわずかに変えて（初期状態はランダムだが $a_i(0)$，$j_i(0)$ とも全ての場合について同一）得られるパターンの変異が図３である。ここでは、N＝２４０，T＝１５０で同心円状の曲線が同一時間面を示している。これによって実際のアサリにみられる殆どのパターンが得られ、また個体発生上、見かけ上の遷移規則変化が認められる。ここでは

$$f = a_i(t)\,\overline{a_{i-1}(t)\,a_{i+1}(t)}\;\overline{\overline{a_{i-1}(t)}\;\overline{a_{i+1}(t)}}$$

で与えられているが、非同時的 updating によってfに従わないかのようにみえる部分が数多くみられることになる。

さて、この例が３節で述べたことの具体例になっていることについて多くを語る必要はないであろう。このシステムの構成要素たる色素沈着細胞の自律的実在をどう表現するかによって、時間は空間的に一様に流れるか、ある部位では折り畳まれ、ある部位では引き伸ばされ、空間的に異なる流れ方をするかのように記述される。それによって、システムは完全に決定論的に記述されるか、摂動を要請する記述となるかの違いがもたらされるのである。

ここでは、時間遅れのスイッチ機能を持つ b_i は a_i と独立な振動子であるという単純な例を用いたが、（４）式のように、a_i，b_i が相互作用をする形式を用いれば、細胞の休止期間はより現実的な表現となり、パターンもよりリアルなものに近づくことが予想される。それによって同一のb- operator を用いても、初期状態のわずかな違いが多様性を生み出すことになろう。

最後に、時間遅れの生物学的意義を扱ったものとして、他に Thomas[17] のKinetic Logic があり、近年 Jerne の免疫系におけるネットワーク理論に応用されていることと[18]、時間遅れを連続化したＢΔＥｓ[19]（Boolean delay equation-s，状態を０，１の２値離散量とし、時間のみ連続量として、遷移規則内に時間遅れを入れたもの。カオス的挙動が みられる）が海水準変動の説明のため発達しつつあることを付記しておこう。

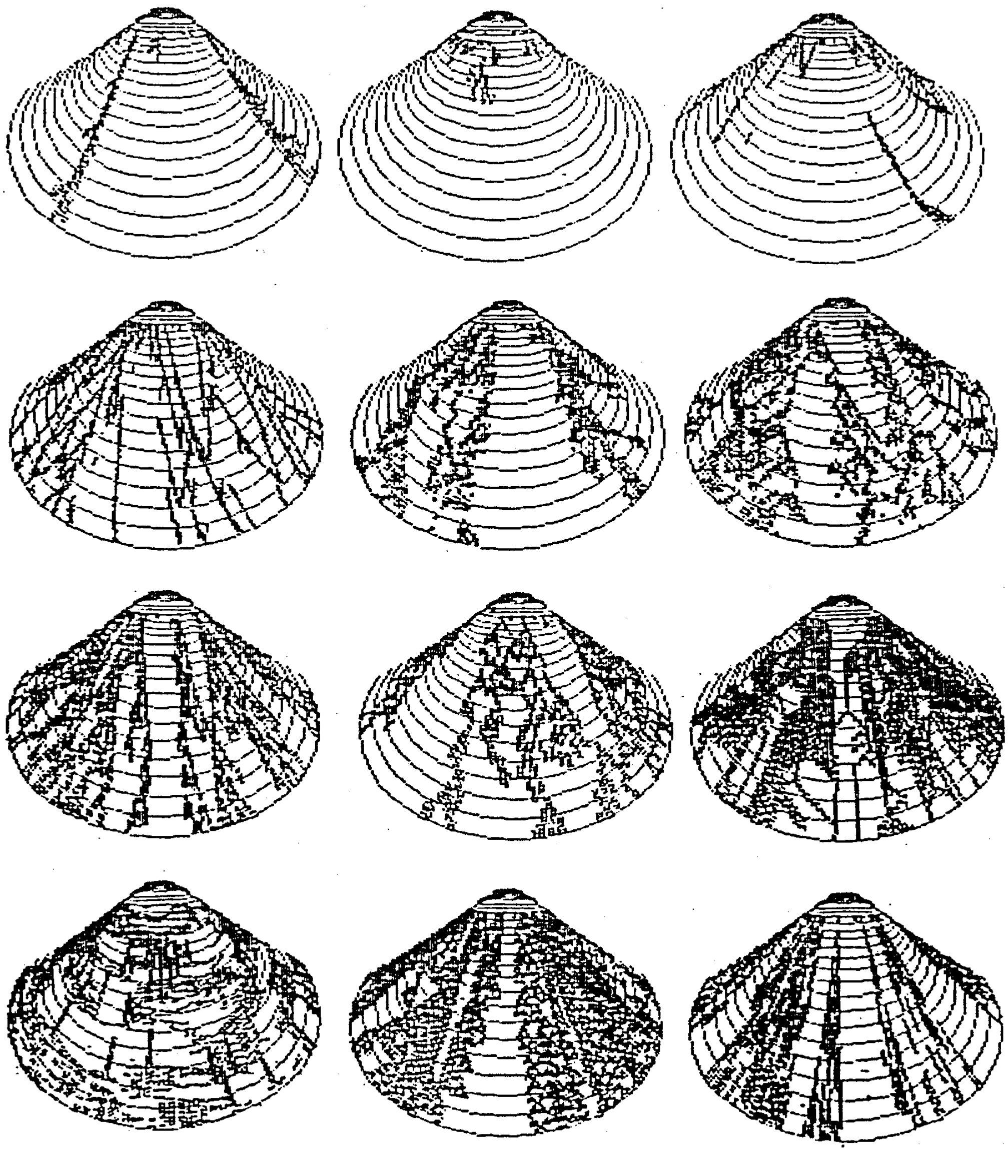


図３．　式(5)より得られる数値計算のパターン。　パラメータ m を変化させることだけで、　このような変異が認められる。　また特定の m においては、振動波から孤立進行波への変化といった、自己創発的なパターンが得られる。各cell において、時間の引き延ばし、圧縮が局在的になされ、見かけ上の変換則が変化する。このようなパターンは、アサリなど多くの貝類の紋様に観ることができる。

5．おわりに

生物の形態（個体群内の変異分布パターン、すみわけ分布、模様を含めて）を成立させる構造を見いだそうとする生物学的構造主義[20][21]は、研究者によってかなり構造の定義が曖昧であるが、生物の形態の構造というものは、universality をもった少数個に納まらないのではないかという予想が、少なからず誰の頭にもあったようだ。別言すると、平衡系から平衡系への変換則として記述される構造を意識する限り、生物にとっては数多くの構造が必要となり、形態の個別的絵合わせとしてそういった構造を記述することよりも、むしろ構造が任意にその形態に対をなしているということや、構造変換、構造の起源といった問題に、生物学的構造主義の焦点は当初から向けられていたといえる。

しかし、そのような構造変換のイメージは、非平衡系の変換則としての構造、相互作用に有限時間を要する様を記述した構造により取って代わられるべきであろう。この構造に対するイメージの相違は、形態なるものの構成単位に対する認定に起因することは小論で述べた通りである。ここでは時間遅れを考慮した形で決定論的に理解しようとするアプローチについて述べたが、構造という名を冠する以上、全ての場合を出現させ得る（構造変換が要請されるようにすら見える）決定論によって生命現象を理解しようとすることが、生物学的構造主義の標榜するものだと考えられる。その意味で、有限セル・オートマトンの代数学的特性をも説明可能な、ブラウン代数は[22]、非同時的オートマトンなる拡張においても、有効な記述言語足りうるであろう（貝殻紋様への一般的応用については、文献２３）を参照のこと）。

引用文献

1) Stanley, S. (1979) Macroevolution, Freeman & Company.

2) Glansdorff, P. & Prigogine, I. (1971) Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations, Wiley-Intersciences.

3) Varela, F. J. (1979) Principles of biological autonomy, North-Holland.

4) Varela, F. J. & Gougen, J. (1978) In: Progress in cybernetics and

systems research III (edited by Trappel, R. Klir, G. J. & Ricciardi, L.), 48, John Wiley & Sons.

5) Matsuno, K. (1980) Origins of Life 10, 39.

6) Matsuno, K. (1985) BioSystems 17, 179.

7) Haken, H. (1978) Synergetics-An Introduction, Springer-Verlag.

8) Varela, F. J. (1987) 2nd edition of 3).

9) Spencer-Brown, G. (1969) Laws of Form, George Allen & Unwin.

10) Gunji, Y. (in preparation)

11) Turing, A. M. (1952) Phil. Trans. Roy. Soc. London, B237, 37.

12) Waddington,C. H. & Cowe, J. (1969) J. theor. Biol. 25,219.

13) Ermentrout, B., Campbell, J. & Oster, G. (1986) Veliger 28,369.

14) Lindsay,D. H. (1982) Differentiation 2, 32.

15) Meinhardt, H. Klinger, M. (1987) J. theor. Biol. 126,63.

16) Wolfram, S. (1984) Physica 10D, 1.

17) Thomas, R. (1979) Kinetic Logic, Lecture Notes on Biomathematics 29, Springer-Verlag.

18) Kaufman, M. (1985) In: Dynamical systems and cellularautomata (ed. by Demongeot, J., Goles, E. & Tchuente, M.) 207, Academic Press.

19) Dee, D. & Ghil, M. (1984) SIAM J. Appl. Math. 44(1), 111.

20) Webster, G. & Goodwin, B. C. (1982) J. Soc. Biol. Struc., 5,15.

21) Sibatani, A. (1985) Rivista di Biologica, 78, 373.

22) Gunji, Y. (1988) PhysicaD (in press)

23) Gunji, Y. (submitted to J. theor. Biol.)